

بهینه سازی مصرف فولاد در سازه های تونلی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی

رضا خدادادیان^{۱*}، شقایق یگانه

۱-مدیر واحد تحقیق و توسعه، کارشناسی ارشد ژئوتکنیک از دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، شرکت گروه سرمایه گذاری مسکن، khodadadyreza@gmail.com

۲-کارشناس تحقیق و توسعه، کارشناسی ارشد مدیریت پروژه و ساخت از دانشگاه تهران، شرکت گروه سرمایه گذاری مسکن، Yeganeh.sh@gmail.com

چکیده

ساختمانهای بتن مسلح قالب تونلی در گروه سیستم های سازه ای با دیوار باربر قرار می گیرد که به دلیل قابلیت ساخت صنعتی با سرعت و کیفیت ساخت مطلوب می تواند در انبوه سازی ها استفاده گردد. از طرفی فقدان اطلاعات طراحی ویژه چنین سازه هایی در مدارک فنی، آیین نامه ها و استانداردهای مورد استفاده در طراحی ساختمانهای کشور، مطالعه درخصوص رفتار این سازه ها را تحت اثر بارهای جانبی ناشی از زلزله، به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل نموده است. به همین منظور، پژوهشی با رویکرد شناخت بیشتر رفتار اینگونه سازه ها (تعیین ضریب رفتار و پریود سازه) برپایه مدل سازی در نرم افزارهای المان محدود ABAQUS و Perform 3D، تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی، تعیین ضریب رفتار نیاز و موجود در دو سطح خرابی محلی و کلی و نهایتاً بهینه سازی طرح سازه نهایی صورت گرفت و روابط و مقادیری برای پارامترهای دینامیکی نظیر ضریب رفتار و پریود سازه پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی: سازه تونلی، نرم افزارهای المان محدود، رفتار سازه، تحلیل دینامیکی غیرخطی، بهینه سازی سازه

۱- مقدمه

سیستم قالب تونلی (Tunnel Form) اجرای ساختمانهای با سیستم باربر دیوار و سقف بتنی است که به دلیل شکل قالبهای مورد استفاده (شکل ۱)، نام تونلی بر آن گذاشته شده است. در این روش ساخت، دیوارها و سقف بصورت یکپارچه و همزمان، قالب بندی، آرماتورگذاری و بتن ریزی می شوند. این روش ضمن افزایش سرعت و کیفیت اجرا، عملکرد سازه ای و رفتار لرزه ای مجموعه سازه را به دلیل یکپارچگی اعضا و اتصالات آن، به نحو چشمگیری ارتقا می بخشد.



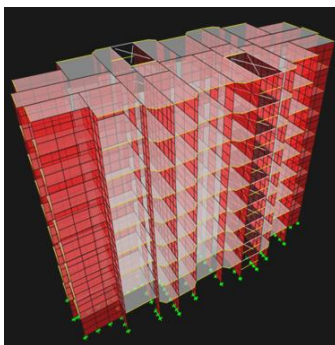
شکل ۱: سیستم ساخت تونلی - پروژه آذران تبریز (شرکت سرمایه گذاری مسکن آذربایجان)

^۱ نویسنده مسئول: رضا، خدادادیان، khodadadyreza@gmail.com

این فناوری در سال ۱۳۸۶ توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ایران، بعنوان یکی از سیستمهای نوین ساختمانی مورد بررسی و تایید قرار گرفته و تاییدیه فنی آن برای شرکت گروه سرمایه گذاری مسکن صادر گردیده است.

۲- ویژگی های سازه تونلی

سیستم سازه تونلی (Tunnel System) از نظر آیین نامه زلزله در گروه ساختمانهای با دیوار برشی بتن مسلح قرار گرفته که بسته به شکل پذیری انتخابی بصورتهای معمولی، متوسط و ویژه، طراحی و اجرا می گردد. یکی از مهمترین ویژگی های این سیستم سازه ای، عملکرد جعبه ای (Box System) آن و بهبود رفتار لرزه ای در برابر بارهای ثقلی و جانبی می باشد. سازه اینگونه ساختمانها درجه نامعینی (Redundancy) بالایی داشته و امکان تشکیل مفصل های پلاستیک در اعضا به تاخیر می افتد، در نتیجه قابلیت تحمل بیشتری در برابر نیروها و لنگرها وجود دارد. بطوریکه تجارب بررسی شده در کشورهای دیگر از جمله ترکیه نشان می دهد که در زلزله های سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳، تنها آسیبهای گزارش شده مربوط به تخریب و یا ترک خوردگی اعضای غیر سازه ای مانند پانلهای پیش ساخته و نما بوده و هیچگونه تخریب و یا آسیب جدی در سازه دیده نشده که خود گواه بر عملکرد بهینه لرزه ای اینگونه ساختمانهاست. از دیگر ویژگی های این سیستم، تغییر ماهیت تمرکز تنش از حالت متمرکز بصورت گسترده در المانهاست که می تواند عملکرد باربری سازه را بهبود بخشد.



شکل ۲: مدل نرم افزاری سازه تونلی

فونداسیون اینگونه ساختمانها بصورت گسترده و سقف آن نیز بصورت دال تخت طراحی می گردد. سقفها بصورت دیافراگم صلبی است که قابلیت مناسبی برای انتقال بارهای قائم و جانبی به دیوارها دارا می باشد. یکی از ویژگی های مورد توجه در این سیستم، تقارن سازه ای و منظم بودن ساختمان در ارتفاع و پلان است که منجر به عملکرد بهتر رفتار لرزه ای در پیچش ساختمان و مصرف بهینه مصالح استراتژیک ساختمان (بتن و فولاد) می شود.



شکل ۳: نمونه ای از پلان معماری با سیستم تونلی^۱

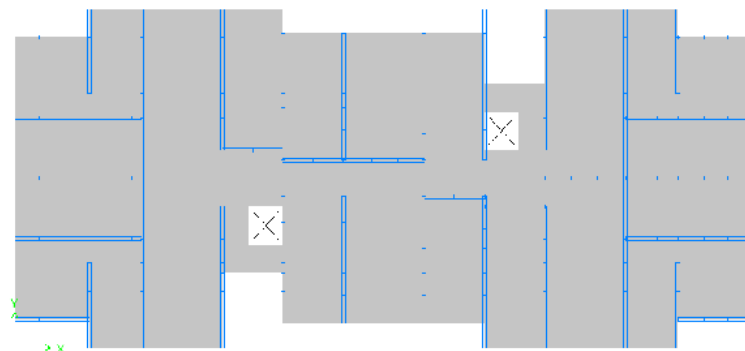
^۱ طراحی در مهندسین مشاور سرمایه گذاری مسکن

۳- الزامات طراحی سازه تونلی [۱]

- رعایت حداقل مقاومت فشاری نمونه استوانه ای 25 MPa برای بتن سازه ای و حداقل تنش سیستم 400 MPa برای فولاد الزامی است.
- طراحی و اجرای جزئیات مناسب در محل اتصال دیوارهای غیرسازه ای به منظور عدم مشارکت در سختی جانبی سازه الزامی است.
- در صورت نیاز به استفاده از دهانه های بیش از $5/5$ متر، استفاده از تیر لبه ای معکوس در جلوی دهانه تونلها و یا ازدیاد ضخامت دال (طبق محاسبه سازه ای) ضروری است.
- تمامی دیوارهای باربر، سقف ها می بایست دارای ضخامت یکسان باشند.
- جهت جلوگیری از نشست نامتقارن ، طول ساختمان در جهت عمود بر محور طولی قالب های تونلی می بایست حداکثر 25 متر در نظر گرفته شوند.
- پیش بینی تمهیدات سازه ای در محل نصب تابلوهای برق و تمامی بازشوهای سقفی.
- منظم بودن ساختمان در ارتفاع و پلان ضروری است.
- بکارگیری حداکثر دهانه $5/5^m$ برای سقف حداکثر ارتفاع خالص 3^m (بدون احتساب ضخامت سقف) و حداقل ضخامت 15^{cm} برای دیوارهای هر طبقه در این سیستم مجاز است.
- سطح مقطع اسمی دیوارهای سازه ای در هر جهت باید حداقل 3% سطح زیربنای طبقه باشد.
- سطح مقطع اسمی دیوارهای سازه ای یک جهت می بایست حداقل 80% جهت دیگر باشد.

۴- معرفی ، رفتارشناسی و تحلیل سازه

ساختمان مورد مطالعه بصورت سازه بتن آرمه با سیستم قالب تونلی، در هشت طبقه و در شهر جدید پردیس، ضخامت دیوارها در هر دو جهت اصلی ساختمان 20^{cm} می باشد. در این ساختمان ارتفاع طبقات $2/96$ متر، نوع پوشش سقف دال بتن آرمه به ضخامت 15 سانتیمتر و سیستم سازه ای مقاوم در برابر نیروهای جانبی در هر دو امتداد، دیوار برشی بتن مسلح معمولی است. ساختمان منظم در پلان و ارتفاع می باشد و نوع خاک محل بر اساس طبقه بندی آیین نامه 2800 (ویرایش سوم) خاک نوع II و مقاومت فشاری مشخصه بتن مصرفی در طرح اعضای بتنی $f_c = 240 \text{ Kg/cm}^2$ می باشد.

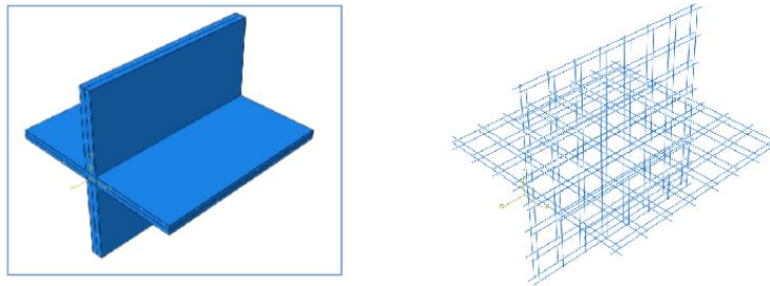


شکل ۴: پلان تیپ B پروژه پردیس

۴-۱. شناخت عملکرد رفتاری المانهای دال-دیوار و دیوارهای متعامد [۲]

۴-۱-۱. اجزاء محدود اتصال دال به دیوار

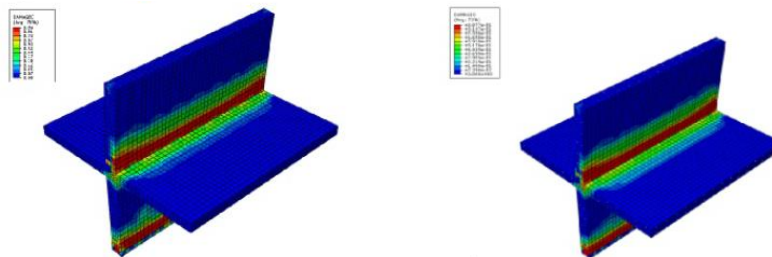
در این مرحله، بررسی شمای ترک خوردگی و مود خرابی اتصال دال به دیوار برشی بتنی در سیستم قالب تونلی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS صورت گرفت و اجزای تشکیل دهنده مدل اصلی یکی از اتصالات دال به دیوار ساخته شد که شامل میلگردها و بتن مربوط به دیوار و دال است. این کار برای بررسی امکان وجود محصور شدگی در منطقه تماس دال به دیوار انجام می شود. میلگردها به صورت المانهای یک بعدی دو نیرویی با استفاده از المانهای wire مدلسازی و بتن با استفاده از مدل solid بصورت سه بعدی مدلسازی شدند.



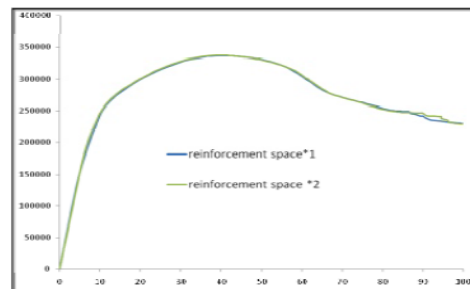
شکل ۵: اعضای بتنی و آرماتورها داخل آن

۴-۱-۲. بررسی محصور شدگی بتن در منطقه اتصال دال به دیوار

با توجه به مدلسازی های انجام شده در نرم افزار ABAQUS منحنی نیرو-تغییر مکان دو مدل با هم برابر می باشد و محصور شدگی بتن در منطقه اتصال دال به دیوار تاثیر چندانی ندارد. لذا در مدلسازی با نرم افزار Perform نیز هیچگونه اثرات محصور شدگی در مدلسازی اتصال دال-دیوار در نظر گرفته نمی شود.



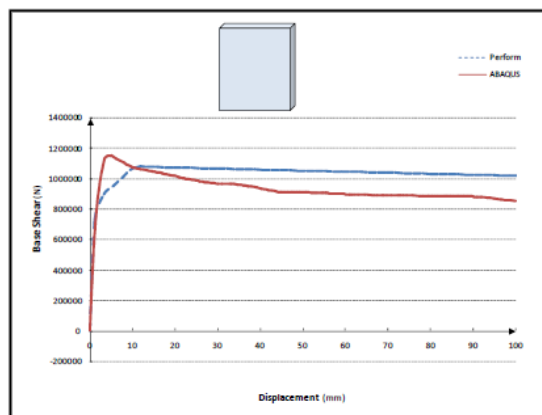
شکل ۶: کانتور خرابی فشاری (خرد شدگی) در بتن در مدل اول و دوم



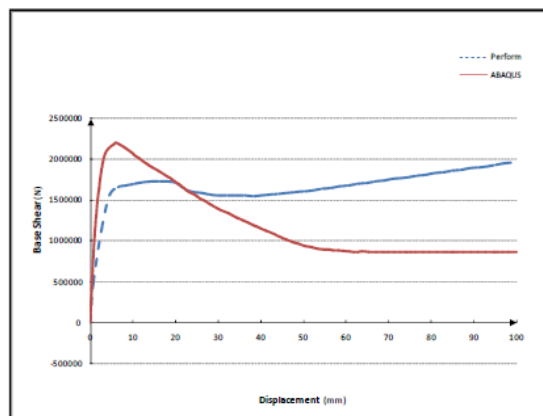
شکل ۷: منحنی نیرو-تغییر مکان برای مدل های اول و دوم

۳-۱-۴. بررسی اثر دیوارهای متعامد

باتوجه به ویژگی سیستم تونلی که بخش عمده ای از المانهای دیوارهای سازه ای بصورت دیوارهای برشی متقاطع می باشد، بررسی رفتار اینگونه دیوارها امری ضروری بشمار می آید. در همین راستا مدلهای مختلفی از دیوارها و بارگذاری آنها در نرم افزارهای ABAQUS , Perform مدل سازی شد و نتایج آنها با هم مقایسه گردید تا اثرات اندرکنش دیوارها بررسی شوند.



شکل ۸: مقایسه نتایج ABAQUS و Perform در مدل اول (طول دیوارو بارگذاری در جهت Z)



شکل ۹: مقایسه نتایج ABAQUS و Perform در مدل سوم دیواریکی در جهت محور Z و دیگری در جهت محور X و بارگذاری در جهت محور Z

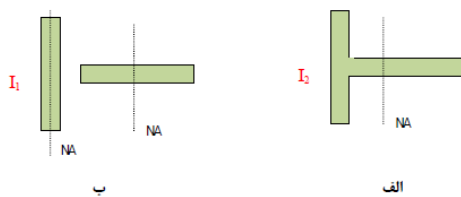
و حاصل ارزیابی های مدل ، رابطه پیشنهادی زیر می باشد:

۱. محاسبه پارامتر اصلاح α که براساس مجذور نسبت سختی دیوارهای عمود برهم در حالتیکه بعنوان یک مقطع محسوب شده

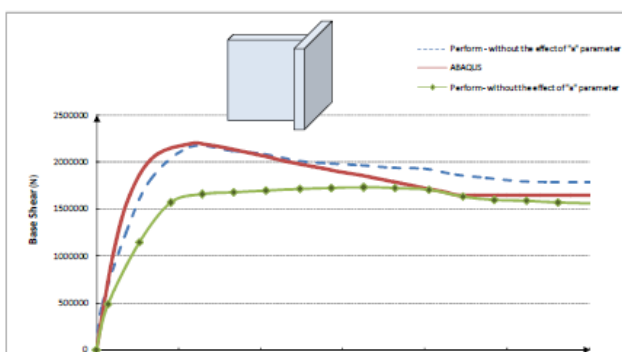
به سختی دیوارهای عمود برهم در حالتی که بعنوان دو مقطع جدا از هم محسوب می شوند. $\alpha = \sqrt{I_2/I_1}$

۲. افزایش مقادیر کرنش های پلاستیک در نمودار رفتاری آرماتورهای مقطع به نسبت پارامتر α و افزایش در مقدار تنش های

تسلیم و نهایی به نسبت پارامتر α



شکل ۱۰: دیوارهای عمود برهم درحالتی که الف: بعنوان یک مقطع ب: دو مقطع جدا از هم محسوب می شود.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج ABAQUS و Perform قبل و بعد از اصلاح با پارامتر α برای دیوار متعامد

۴-۲. تحلیل و طراحی سازه قالب تونلی Etabs

ابتدا تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه در نرم افزارهای Safe-Etabs انجام گرفت:

جدول ۱: محاسبه ضریب زلزله ساختمان براساس آیین نامه ۲۸۰۰

محل احداث ساختمان:		
نوع خاک:		
II		
1.0	I	ضریب اهمیت:
0.35	A	شدت مبنای طرح:
0.10	T_0	پارامترهای مربوط به ضریب بازتاب ساختمان:
0.5	T_1	
1.5	S	
23.68	H	ارتفاع ساختمان:
سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی:		
دیوار برشی معمولی		
0.537	$T = (0.05H^{3/4})$	پریود ارتعاشی ساختمان:
2.384	B	ضریب بازتاب ساختمان
5	R	ضریب رفتار:
0.1669	$C = \frac{ABI}{R}$	ضریب زلزله:

سازه مورد مطالعه تحلیل دینامیکی شد و از طیف آیین نامه ۲۸۰۰ برای خاک نوع II استفاده و برش پایه ناشی از تحلیل دینامیکی بامقدار برش پایه استاتیکی همپایه گردید. همچنین دراین سازه اثر ترک خوردگی مقاطع، کنترل تغییر مکان جانبی، اثر P - D کنترل گردید. دراین ساختمان اثر P - D نسبی طبقات، کنترل خیز و کنترل پیچش نیز صورت گرفت.

و نتایج طراحی :

جدول ۲: آرماتور حداقل قائم طبق آیین نامه ACI318 برای دیوار برشی معمولی

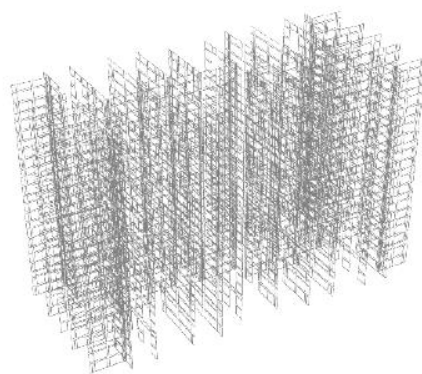
آرماتور موجود	آرماتور لازم	A_s (cm ² /m)	نسبت آرماتور حداقل به مساحت کل	$db \leq 16$	ضخامت دیوار
T8 @20 $A_s = 5 \text{ cm}^2$	T8 @25 $A_s = 4 \text{ cm}^2$	2.4	0.0012	آرماتور قائم	t= 20 cm

جدول ۳: آرماتور حداقل افقی طبق آیین نامه ACI318 برای دیوار برشی معمولی

آرماتور موجود	آرماتور لازم	A_s (cm ² /m)	نسبت آرماتور حداقل به مساحت کل	$db \leq 16$	ضخامت دیوار
T8 @20 $A_s = 5 \text{ cm}^2$	T8 @25 $A_s = 4 \text{ cm}^2$	4	0.0020	آرماتور افقی	t= 20 cm

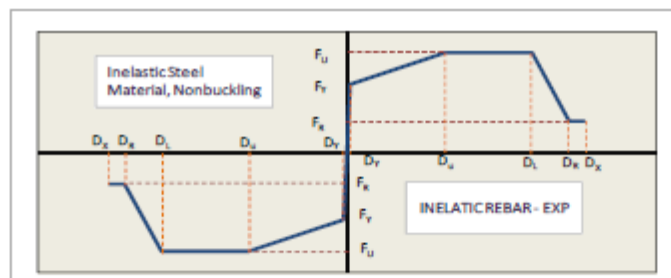
۳-۴. معرفی سطح عملکرد سازه موجود با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی

برای در نظرگرفتن رفتار دقیق سازه در ناحیه غیرخطی، مدل هندسی سازه در نرم افزار Perform 3D ایجاد شد. برای مدلسازی رفتار غیرخطی دیوارها به دلیل وجود تلاشهای اندرکنشی در آن و به منظور دقت در برآورد چرخش های پلاستیک از المانهای فایبر استفاده شده است. این کاربرد تنها به منظور عبور از سطح مفهوم پلاستیسیته متمرکز به سطح دقیقتری از رفتار غیر خطی که در آن رابطه تنش-کرنش مواد، رفتار غیرخطی را ایجاد مینماید، صورت گرفت. نوع فایبر در نظر گرفته شده بستگی به تلاش حاکم بر رفتار غیرخطی دیوار دارد. در معرفی پایه دیوارها، رفتار خمشی بوسیله المانهای فایبر عمودی با رفتار غیرخطی مدلسازی شده و رفتار غیرخطی برشی در المان های دیواری کنترل شونده توسط برش، از یک لایه با رفتار برشی غیرخطی در دیوارها و تیرهای پیوند استفاده گردید.



شکل ۱۲: نمایش هندسه سازه مدل شده در نرم افزار Perform

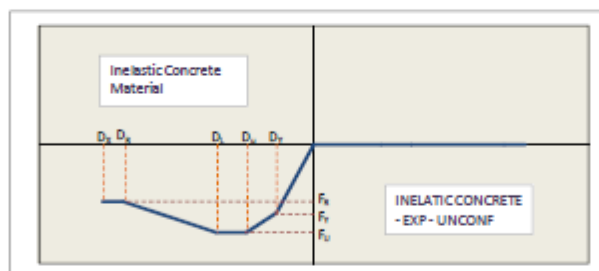
از میان مدل های رفتاری موجود در نرم افزار Perform برای مدلسازی رفتار فولاد، مدل رفتاری فولاد بدون کمانش جهت مدلسازی رفتار آرماتورهای مدفون در بتن انتخاب شد. پارامترهای مدلسازی این رفتار در شکل ۱۳ ارائه شده است. در شکل ۱۴ مشخصات رفتاری بتن محصورنشده که در مدلسازی رفتار دیوار مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است.



	D_Y	D_U	D_L	D_R	D_X
Tension	0.0022	0.066	0.12	0.14	0.15
	$F_R (kg/cm^2)$	$F_Y (kg/cm^2)$	$F_U (kg/cm^2)$		
	2640	4600	6600		

	D_Y	D_U	D_L	D_R	D_X
Compression	-0.0022	-0.066	-0.12	-0.14	-0.15
	$F_R (kg/cm^2)$	$F_Y (kg/cm^2)$	$F_U (kg/cm^2)$		
	-2640	-4600	-6600		

شکل ۱۳: مشخصات رفتاری میلگردها

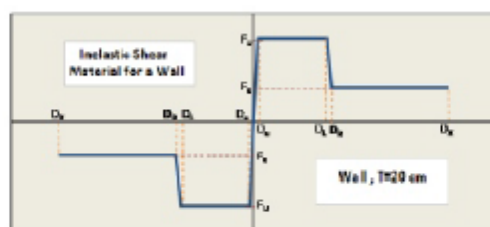


	D_Y	D_U	D_L	D_R	D_X
Compression	-0.00091	-0.002	-0.0022	-0.004	-0.005
	$F_R (kg/cm^2)$	$F_Y (kg/cm^2)$	$F_U (kg/cm^2)$		
	-144	-210	-240		

شکل ۱۴: مشخصات رفتاری بتن محصور نشده

۴-۴. مدل پایه های دیوار و تیرهای پیوند

رفتار برشی غیرخطی پایه های دیوار و تیرهای پیوند براساس ضخامت و نحوه میلگردگذاری آنها طبق جدول ۱۷-۶ دستورالعمل بهسازی لرزه ای ایران تعیین گردید. در شکل ۱۵ مشخصات رفتار برشی غیرخطی یکی از دیوارها نشان داده شده است.



	D_X	D_U	D_L	D_R	D_X
Positive	0.021	0.0004	0.0076	0.0082	0.021
	$F_R (kg/cm^2)$	$F_U (kg/cm^2)$			
	3.92	9.81			

	D_X	D_U	D_L	D_R	D_X
Negative	-0.021	-0.0004	-0.0076	-0.0082	-0.021
	$F_R (kg/cm^2)$	$F_U (kg/cm^2)$			
	-3.92	-9.81			

شکل ۱۵: مشخصات رفتار برشی غیر خطی دیوار

در بارگذاری نیز علاوه بر ضوابط مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان، علیرغم بارگذاری سطحی انجام گرفته شده در مرحله طراحی، در مدل ساخته شده در نرم افزار Perform این بارها به صورت متمرکز در مدل اعمال شده است.

۴-۵. تعیین تغییر مکان هدف

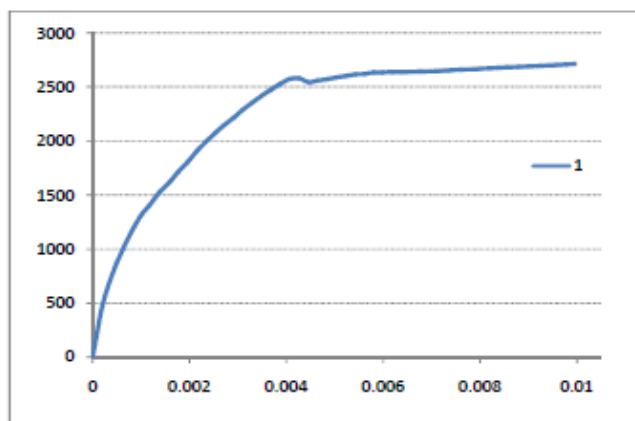
به منظور تعیین نقطه عملکرد سازه بایستی طیف طرح متناظر با سطوح خطر لرزه ای انتخابی راتعیین نمود. برای ارزیابی این سازه، طیف خطر لرزه ای با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال عمر مفید سازه برای خاک نوع دو (۴۷۵ ساله) در نظر گرفته شد. روش مورد استفاده در تعیین تغییر مکان هدف، روش ضرایب تغییر مکان می باشد.

جدول ۴: تعیین تغییر مکان هدف در سطح عملکرد ایمنی جانی

Push NO.	C_0	T_s	S_a	V_y	C_m	R	C_1	C_2	C_3	δ_1	H	δ_{drift}
1	1.45	0.31	0.875	1330	0.674	2.40	1.36	1	1	4.14	2368	0.0017
2	1.45	0.394	0.875	1870	0.68	1.72	1.11	1	1	5.48	2368	0.0023
3	1.45	0.265	0.875	1060	0.668	2.08	1.50	1	1	3.54	2368	0.0015
4	1.45	0.35	0.875	1220	0.66	2.56	1.26	1	1	4.90	2368	0.0021
5	1.45	0.501	0.875	1970	0.658	1.58	1.00	1	1	7.97	2368	0.0034
6	1.45	0.47	0.875	1510	0.657	2.06	1.03	1	1	7.24	2368	0.0031
7	1.45	0.464	0.875	1810	0.63	1.65	1.03	1	1	7.04	2368	0.0030
8	1.45	0.44	0.875	1540	0.64	1.97	1.07	1	1	6.56	2368	0.0028
9	1.45	0.31	0.875	1705	0.697	1.93	1.30	1	1	3.95	2368	0.0017
10	1.45	0.41	0.875	1870	0.66	1.67	1.09	1	1	5.81	2368	0.0025
11	1.45	0.285	0.875	1745	0.688	1.86	1.35	1	1	3.48	2368	0.0015
12	1.45	0.397	0.875	1955	0.674	1.63	1.10	1	1	5.51	2368	0.0023
13	1.45	0.428	0.875	2055	0.68	1.56	1.06	1	1	6.17	2368	0.0026
14	1.45	0.46	0.875	2260	0.682	1.43	1.03	1	1	6.89	2368	0.0029
15	1.45	0.4	0.875	1820	0.655	1.70	1.10	1	1	5.60	2368	0.0024
16	1.45	0.42	0.875	2035	0.668	1.55	1.07	1	1	5.98	2368	0.0025

۶-۴. تحلیل استاتیکی غیرخطی مطابق دستورالعمل بهسازی ایران [۳]

پس از تعریف رفتار غیرخطی برای اعضا، تحلیل سازه انجام گرفت و منحنی برش پایه- تغییرمکان بام (بر اساس تغییرمکان نسبی) برای کلیه ترکیبات بارگذاری ترسیم گردید. در شکل ۱۶ منحنی برش پایه- تغییرمکان نسبی بام نشان داده شده است. به دلیل وجود دیوارهای بیشتر، سطح مقاومت در جهت عرضی (Y) کمی بیشتر از جهت طولی (X) می باشد.



شکل ۱۶: منحنی ظرفیت سازه برای ترکیب بارگذاری ۱

نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی:

- در تمامی دیوارها نیروی محوری بسیار کمتر از 35p می باشند لذا فرض اولیه در خصوص موثر بودن تمام دیوارها تحت اثر بار جانبی صحیح می باشد.
- دوران پلاستیک پای دیوارها بسیار کم بوده و معیارهای پذیرش دوران را ارضاء می کنند و اکثراً در حالت الاستیک هستند و آرماتورهای قائم دیوارها به خوبی جوابگو می باشد.
- اکثر دیوارهای جهت طولی در برش مشکل دارند که نشان می دهد سطح مقطع دیوارها در این جهت کم می باشد یا مقدار آرماتوربرشی کم می باشد.
- بیشتر اسپندرها وارد مرحله غیرخطی شده و دچار تغییرشکل های برشی زیادی شده اند و مقادیر تغییرشکل های برشی اسپندرها بالاتر بیشتر از طبقات پایین است که نشان می دهد اسپندرها به خوبی عمل کرده و جذب انرژی را در طبقات مختلف پخش می کنند.

۵- تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت یک زلزله واقعی با نرم افزار Perform

رکوردی که برای بررسی رفتار لرزه ای سازه استفاده می شود باید به دقت انتخاب شود زیرا پاسخ لرزه ای و شکل پذیری سازه ها به ویژگیهای لرزه ای رکورد وارده و ویژگیهای دینامیکی سازه بستگی دارد. در انتخاب رکورد نوع خاک و فاصله از گسل در نظر گرفته شد.

جدول ۵: مشخصات رکوردهای انتخاب شده

Earthquake	Station	Mw	R (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
Northridge 1994/01/17	13123 Riverside - Airport	6.7	101.3	0.064	3.1	0.5

نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی:

- دریافت نسبی در طبقات بسیار کمتر از مقدار مجاز 0.0059 می باشند و مقدار دریافت نسبی در طبقات بالا بیشتر می باشد.
- رفتار سازه تحت رکورد معرفی شده در محدوده خطی بوده است.
- تمام دیوارها کنترل کننده توسط تغییرشکل هستند.
- دیوارها معیارهای پذیرش دوران را ارضاء می کنند و تحت نیروی خمشی در حالت الاستیک هستند و آرما تورهای قائم دیوارها به خوبی جوابگو می باشد.
- نسبت تقاضا به ظرفیت برشی مجاز تحت زلزله نورث ریج در جهت عرضی نشان می دهد که همه دیوارها جوابگوی نیاز برشی بوده اند. و نسبت تقاضا به ظرفیت برشی مجاز تحت زلزله نورث ریج در جهت طولی نشان می دهد که در بیشتر طبقات جوابگوی نیروهای برشی نبوده و مقدار آرما تور برشی کم می باشد.
- در اسپندرلها برش به عنوان پارامتر کنترل شونده توسط تغییرشکل محسوب می شود و در هیچ یک از اسپندرل ها حداکثر لنگر خمشی از ظرفیت لنگر خمشی مجاز تجاوز نمیکند.

۶- اصلاح سازه موجود و طراحی جدید آن با نرم افزار های Safe و Etabs

در طراحی جدید فرض شد که سیستم مقاوم در برابر زلزله، دیوار برشی بتن مسلح متوسط با $R=5$ باشد و با این تغییر مقدار نیروی زلزله وارد بر سازه نیروهای جانبی افزایش می یابد و دیوارها تحت نیروی برشی بیشتری طراحی می شوند. در عوض سطح شکل پذیری پایین تری را نیاز دارد. [۴] سازه مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت تا امکان تامین ملاحظات مقاومتی اعضای سازه ای مورد بازرسی قرار گیرد. تعدادی از دیوارها که معیارهای عملکردی مربوطه را پاسخگو نبودند مشخص شده و با اصلاحات لازم مجددا در نرم افزار Etabs طراحی شدند. این پروسه تا تدقیق و اثبات عملکرد مربوطه (ایمنی جانی) تکرار شد تا طراحی نهایی حاصل گردید.

نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه جدید:

- در حدود گریز نسبی 0.4 تا 0.5 درصد، تغییرشکل های برشی در دیوارها خیلی زیاد شده و به ناحیه افت مقاومت رسیده و دیگر افزایش نیرو را نمی تواند تحمل کند و باعث کاهش مقاومت کل سازه شده و سازه دچار شکست می شود. این مسئله در هر دو جهت دیده می شود.
- برش به عنوان پارامتر کنترل شونده توسط تغییرشکل در پای دیوارها محسوب میشود.
- آرما تورهای برشی بخوبی طراحی شده و جوابگوی سطح عملکردی ایمنی جانی می باشد.

- بررسی نسبت تقاضا به ظرفیت خمشی مجاز پای دیوارها نشان می دهد که در تمام دیوارها این نسبت کمتر از یک بوده است.
- در اسپندرل ها برش به عنوان پارامتر کنترل شونده توسط تغییرشکل محسوب میشود و اسپندرل ها به خوبی عمل کرده و جذب انرژی را در طبقات مختلف پخش میکنند.

۷- برآورد ضریب رفتار (نیاز و موجود در سطح خرابی محلی و کلی) و مقدار ضریب رفتار پیشنهادی با آنالیزهای دینامیکی

جدول ۶: مقایسه مقادیر ضرایب رفتار

	ضریب رفتار	ضریب رفتار موجود برای خرابی موضعی		ضریب رفتار موجود برای خرابی کلی		ضریب رفتار	ضریب رفتار
		ضریب رفتار جهت X	ضریب رفتار جهت Y	ضریب رفتار جهت X	ضریب رفتار جهت Y		
آیین نامه UBC ۹۷	4.5	.....	.....	.....	.....	.....	.....
آیین نامه ترکیه	4	.....	.....	.....	.....	.....	.....
آیین نامه NEHRP	4	.....	.....	.....	.....	.....	.....
آیین نامه Eurocode	3	.....	.....	.....	.....	.....	.....
محاسباتی		4.11	4.79	1.63	2.43	1.90	1.95
پیشنهادی	4.5						

۸- پریود سازه و رابطه پیشنهادی

جدول ۷: مقایسه پریود سازه در آیین نامه های مختلف و مقدار پیشنهادی

	پریود جهت X	پریود جهت Y	درصد خطا X نسبت به تحلیل دینامیکی	درصد خطا Y نسبت به تحلیل دینامیکی
آیین نامه UBC 97	0.408	0.331	53.4	32.9
آیین نامه ترکیه	0.411	0.335	54.5	34.5
آیین نامه NEHRP	0.34	0.312	27.8	25.3
آیین نامه Eurocode	0.411	0.335	54.5	34.5
محاسباتی	0.266	0.249		
پیشنهادی	0.24	0.24	-9.8	-3.6

۹- تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه جدید (با ضریب رفتار و پریود پیشنهادی) در نرم افزار Perform

در نهایت سازه مورد مطالعه با ضریب رفتار و پریود پیشنهادی سازه در نرم افزار Perform مدل سازی و مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. نتیجه کلی اینکه این سازه تحت زلزله واقعی مطابق با طیف طرح آیین نامه ۲۸۰۰ برای سطح خطر یک با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال، سطح عملکرد ایمنی جانی را مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه ای ایران رعایت می کند. طراحی سازه حاصل از این تحلیل با محاسبات پیشین صورت گرفته با تحلیل خطی مقایسه و ارزیابی می گردد و کاهش حدود ۲۷٪ در آرماتورهای قائم و برشی را نتیجه می دهد که می تواند که در جهت کاهش مصرف مصالح استراتژیک پروژه، افزایش سرعت و سهولت اجرایی موثر واقع گردد.

جدول ۸: لیستوفر کلی مقایسه وزن آرماتورهای سازه قدیم و جدید

	سازه طراحی قدیم	سازه طراحی جدید	درصد تغییرات نسبه به سازه قدیم
سازه اعضای	Total Weight (Kg)	Total Weight (Kg)	
دال طبقات	3908	3856.9	-1.31
آرماتورهای قائم	6121.8	2889.4	-52.80
آرماتورهای برشی و خاموت	3020.4	2789.6	-7.64
	13050.3	9536.0	-26.93

۱۰- نتیجه گیری و پیشنهاد:

۱. در اغلب موارد بعلت عدم اجرای دیوارهای برشی پیرامونی، مود پیچشی در تحلیل بر مدهای انتقالی مقدم می شود.
۲. پیشنهاد می شود جهت طراحی اقتصادی تر، سطح مقطع دیوارهای برشی برای طبقات بالایی سازه کمتر از ۳٪ مساحت آن طبقه باشد.
۳. یکی از پارامترهای مهم بر رفتار سازه های با سیستم قالب تونلی، نسبت ارتفاع به بعد^۱ ساختمان در هر جهت می باشد. در صورتیکه این نسبت کم باشد رفتار کلی سازه بصورت برشی می باشد و در صورتیکه این نسبت زیاد باشد، رفتار کلی سازه بصورت خمشی می باشد. علت این امر مربوط به اثر نیروهای غشایی در رفتار خمشی بوده که سبب اعمال نیروهای محوری کششی بر کل سطح مقطع دیوار و ایجاد ترک در ناحیه وسیعی از سطح مقطع دیوار شده و لذا موجب شکست ترد در این سازه ها می شود.
۴. پلان معماری و چیدمان دیوارهای برشی در ساختمان های با سیستم قالب تونلی یکی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار می باشد و رسیدن به یک طرح بهینه از نظر وزن آرماتورهای سازه ای نیاز به همکاری نزدیک مهندسان معماری و سازه دارد. در این رابطه

^۱ تعیین میزان دقیق این نسبت می تواند در پژوهشهای آتی محاسبه شود.

توصیه می شود دیوارهای میانه پلان تا حد ممکن به موقعیت گوشه های پلان انتقال داده شود. در این صورت سختی پیچشی در سازه به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

۵. سیستم سازه ای قالب تونلی از سختی و ضریب اضافه مقاومت بالایی می باشند مقاومت بالایی برخوردار است و با توجه به سطح بالای دیوارهای بتنی به کار رفته اصولاً تحت بارهای زلزله رفتار نرمی از خود نشان داده و لذا کاربرد ضریب رفتار در محدوده $4/5$ می تواند متضمن اقتصاد و ایمنی سازه باشد.

۶. مطالعات انجام یافته جهت برآورد ضریب رفتار در سه سطح طلب و موجود و مقدار آیین نامه ای نشان می دهد که این سیستمهای سازه ای دارای در واقع این سازه ها میتوانند قبل از رسیدن به تسلیم کلی سازه نیروی زیادی را تحمل نمایند. مقدار ضریب اضافه مقاومت در محاسبات ضریب رفتار موجود در جهت طولی و عرضی به ترتیب برابر با $2/6$ و $2/46$ می باشد.

۷. محاسبات ضریب رفتار نشان می دهد با فرض خرابی اسپندردل مقدار حاصل برای ضریب رفتار $1/5$ میباشد. لذا فرض معیار خرابی محلی و محاسبه ضریب رفتار بر اساس آن، فرضی نامعقول بوده که موجب طرحی غیراقتصادی میگردد. لذا همانطوریکه سایر محققین همچون یوکسل و کالکان نیز پیشنهاد نمودند، توصیه میگردد معیار خرابی اسپندردلها به عنوان معیاری برای خرابی سازه مدنظر قرار نگرفته و اسپندردل ها بصورت غیر سازه ای اجرا گردند.[۵]

۸. در دیوارهایی که نسبت به دیوارهای موجود در آن قاب و یا نسبت به کل دیوارهای موجود در یک جهت اصلی دارای طول بلندتری میباشند، بیشتر تحت تاثیر برش بوده و نیرویهای جانبی زلزله را بیشتر بصورت برش جذب مینمایند. در واقع این دیوارها دارای سختی زیادی نسبت به دیوارهای کوتاه بوده و زودتر وارد مرحله پلاستیک می شوند.

۹. در صورتیکه یک دیوار دارای شرایطی باشد که دیوار دیگر بر آن عمود باشد در صورتیکه دیوار عمود دارای عرض موثر کافی باشد، باعث می شود سختی دیوار افزایش یابد و نیروی برشی بیشتری جذب کند که در آرماتورگذاری آن باید این مهم مورد توجه قرار گیرد. همچنین در محل اتصال دو دیوار عمود بر هم از خاموت کافی بهره جست تا دو دیوار رفتار ترکیبی داشته باشند.

۱۰. در سیستم سازه تونلی، پریود سازه بیشتر تحت تاثیر نسبت ابعاد ساختمان، ارتفاع ساختمان، مساحت دیوارهای برشی در جهت طولی و عرضی و بیشترین طول دیوار در جهت طولی و عرضی می باشند.

۱۱. ساختمانهای با سیستم قالب تونلی با ارتفاع کم یا نسبت ارتفاع به طول سازه کم دارای پریود کوتاه بوده و وقتی این سازهها بر روی خاک سخت قرار می گیرند باعث تشدید اثرات زلزله میشوند و پاسخ های سازه افزایش می یابد. توصیه می شود اثر اندرکنش خاک جهت تدقیق در نتایج مدل سازی تحت یک آنالیز دینامیکی منظور گردد.

مراجع

- [۱] مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، کتابچه فناوری های نوین ساختمانی؛ صفحه ۲۰ تا ۲۳
- [۲] بهشتی و همکاران، "پژوهش بازنگری طرح سازه تونلی"؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، جلد های ۳ و ۴
- [۳] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت فنی، "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ایران"؛ نشریه ۳۶۰؛ سال ۱۳۸۵
- [۴] مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، "آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله"؛ ویرایش سوم

[5] Can Balkaya, Erol Kalkan, "Seismic vulnerability, behavior and design of tunnel form building structures", Middle East Technical University, Turkey